

不同施肥模式对洱海流域水稻产量和氮磷损失的影响

张顺涛^{1, 2}, 康锁倩^{1, 2}, 杜雪丽^{2, 3}, 谭丹^{2, 3}, 王睿⁴, 黄飞⁵,
危常州⁶, 郭世伟⁷, 徐玖亮^{1, 2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100010; 2. 洱海流域农业绿色发展研究院, 云南 大理 671000; 3. 云南大学农学院, 云南 昆明 650000; 4. 大理苍洱留香农业发展有限公司, 云南 大理 671000; 5. 云南省大理市种植业发展中心, 云南 大理 671000; 6. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000; 7. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 水稻是洱海流域最主要的粮食作物之一, 不合理的施肥方式导致水稻产量和产值较低, 同时较高的稻田氮、磷损失对洱海面源污染防治提出考验。探究有机-无机绿色智能肥对洱海流域水稻产量和环境排放的影响, 为洱海流域水稻合理施肥提供理论依据。于2022年在云南省大理白族自治州开展田间试验, 设置4个处理, 分别为不施肥、单施化肥(常规模式)、单施有机肥(有机模式)和施用有机-无机绿色智能肥(绿色模式), 分析了水稻产量及其构成因子、氮利用效率、氮挥发、径流氮磷损失和径流水化学需氧量、产值等。试验结果表明:(1)与不施肥处理相比, 常规、有机和绿色模式的水稻产量分别提高了44.4%、20.8%和68.1%, 绿色模式的水稻产量最高。绿色模式主要增加了水稻的穗数和穗粒数, 进而提高了水稻产量。(2)绿色模式的地上部氮累积量显著高于常规模式和有机模式。绿色模式的氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力较常规模式分别提高12.5%、8.8 kg/kg、9.0 kg/kg和13.0 kg/kg。(3)与常规模式相比, 有机模式和绿色模式的氮挥发量、氮/磷径流损失量分别降低了63.3%和56.3%、38.1%和41.4%、6.5%和14.4%, 绿色模式的氮盈余量降低了41.5%。(4)绿色模式的净利润比常规模式和有机模式分别提高了2.7万和2.4万元/hm²。绿色模式显著提高了水稻穗粒数和穗数, 进而提高了水稻产量, 水稻氮素累积量和氮肥利用率均显著增加。同时, 绿色模式较常规施肥模式能够降低土壤氮挥发、氮磷径流损失和土壤氮素盈余量。因此, 施用有机-无机绿色智能肥在洱海流域能够实现水稻的高产、高效、减排和增值协同的效果。

关键词: 水稻; 绿色智能肥; 洱海流域; 氮挥发; 环境排放; 绿色食品

肥料是作物的“粮食”, 在保障我国粮食安全中起着不可替代的作用, 同时优化施肥对提高养分利用效率和降低环境排放有重要影响^[1]。大量研究表明, 化肥-有机肥配施可以提高水稻产量并减少养分损失^[2-3]。徐明岗等^[4]研究发现, 化肥-有机肥配施可以显著提高水稻产量和肥料利用率、减少环境污染、培肥土壤, 并提出化肥-有机肥配施是南方水稻田简单易行的环境保护施肥技术。任科宇等^[5]基于文献数据分析了有机替代对长江流域水稻产量和籽粒氮含量的影响, 结果表明, 有机替

代比例为30%~60%能够显著提高水稻产量和籽粒氮含量。然而, 一些研究发现, 有机农业(只施用有机肥)条件下农作物减产20%~40%, 蔬菜减产20%~50%^[6]。因此, 将有机农业与常规农业相结合, 协调土壤无机与有机养分平衡是中国农业未来的发展方向。张福锁院士团队为推动我国化肥产业绿色转型升级, 支撑农业绿色发展, 提出了绿色智能肥的概念, 即根据土壤-植物-微生物-肥料-环境之间的协同原理, 构建匹配土壤、匹配作物、匹配气候环境条件的绿色智能肥料^[7]。

洱海流域是云南省第二大淡水湖流域, 也是中国农业高质量发展和环境保护的典型地区^[8]。近些年, 随着洱海流域旅游业、农业、工业等快速发展, 入湖污染物增加了洱海水体的污染负荷, 面源污染日益加重^[9]。随着《洱海保护治理与流域

收稿日期: 2024-01-20; 录用日期: 2024-03-25

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202202AE090034)。

作者简介: 张顺涛(1995-), 博士后, 主要从事作物养分管理与土壤培肥研究。E-mail: zhangst@cau.edu.cn。

通讯作者: 徐玖亮, E-mail: jlxu9@cau.edu.cn。

生态建设“十三五”规划》和《洱海保护管理规划(2020—2035)》的实施,洱海流域保护治理成效显著,但农业面源污染仍是洱海富营养化的主要污染源,主要包括农村生产生活、畜禽养殖和农田面源污染^[10-11]。研究表明,2019年洱海流域农业面源污染的氮和磷总排放量分别为6500和400 t,远超出洱海Ⅱ类水质的水环境承载力^[8]。洱海流域土壤有机质、全氮、有效磷含量丰富,土壤肥力较高,农业面源污染风险大^[12]。水稻作为洱海流域的主要作物之一,常年种植面积15.3千hm²,不合理的施肥、管理粗放导致稻田氮和磷元素损失较高^[13]。为明确洱海流域水稻高产、高效、绿色、高值的施肥方式,本研究设置常规化肥模式、有机模式和绿色模式等施肥处理,通过田间试验探究洱海流域不同施肥模式对水稻产量、氮利用效率、环境排放和产值的影响,以期为洱海流域水稻施肥管理提供科学理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况

试验地位于云南省大理市湾桥镇古生村(25° 81' 94" N, 100° 14' 21" E),属于低纬度高原中亚热带季风气候类型,海拔1980 m,温度适宜,干湿分明,平均气温14.6℃,多年平均降水量为1048 mm,降水集中在5—10月,地下水位0.65 m^[14]。试验地土壤质地为黏土,前茬油菜,耕层0~20 cm土壤有机质含量68.1 g/kg,全氮含量4.3 g/kg,有效磷含量68.3 mg/kg,速效钾含量99.5 mg/kg, pH 6.2。

1.2 试验设计

试验共设4个处理:不施肥、常规模式、绿色模式、有机模式,每个处理6个重复,共24个小区,随机区组设计。不同施肥处理的氮、磷、钾养分投入量如表1所示。常规模式肥料为傣王稻1号肥(N-P₂O₅-K₂O=18-10-12)、尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%);绿色模式为有机-无机绿色智能肥(N-P₂O₅-K₂O=8-4-4);有机模式为有机肥[油饼(油枯),有机质含量46%,N-P₂O₅-K₂O=5.5-1.5-1.0],所有肥料均采用人工撒施方式。每个试验小区面积700 m²以上,每个小区之间筑高40 cm、宽25 cm的水泥埂,每个小区单独排灌。选用7寸水稻插秧机,行间距约为23 cm,株距调整为12 cm左右,机械插

秧后当天人工补苗(4~5株/穴)。供试品种云粳37是云南省农业科学院粮食作物研究所选育的优质软香型粳稻。水分管理:分蘖期保持2~5 cm浅水层;分蘖末期前均为干湿交替灌溉,浅水层自然落干3~5 d后再灌入2~5 cm浅水;孕穗扬花期保持田面水层3~5 cm,持续至扬花结束,之后仍按照干湿交替进行管理,收获前2~3周进行排水晾田。病虫草害农药使用满足《绿色食品农药使用准则》(NY/T 393—2020)和洱海保护条例的相关要求。

表1 不同处理氮磷钾肥投入量 (kg/hm²)

| 处理 | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 不施肥 | 0 | 0 | 0 |
| 常规模式 | 基肥 54、蘖肥 69、 穗肥 69, 共 192 | 基肥 120 | 基肥 110 |
| 绿色模式 | 基肥 180 | 基肥 80 | 基肥 80 |
| 有机模式 | 基肥 180 | 基肥 50 | 基肥 80 |

1.3 有机-无机绿色智能肥研发生产

1.3.1 设计思路

(1) 适合水稻绿色生产,设计单产预计总养分投入量后,按有机:无机=1:1设计氮素用量以满足绿色食品《绿色食品-肥料使用准则》(NY/T 394—2000)要求,由此确定肥料中氮养分含量;(2) 根据洱海流域土壤中有效磷含量较高的特点,提出以氮带磷和磷总量控制的原则:通过氮促进水稻扩大型生长,消耗土壤中的磷库,磷素投入总量相当于水稻磷素需求的70%或以下;(3) 根据不施肥土壤对作物供钾量和水稻钾素吸收量确定肥料中钾肥补充量;(4) 水稻是喜硅作物,吸收量大且可以提高光合速率,提高抗病性避免倒伏减产;同时,水稻是锌敏感作物,锌是易缺乏元素;因此,应补充硅、锌、钙中微量元素。

1.3.2 原料选择

(1) 有机原料:有机原料应富含氮素、限制磷素,采用高氮低磷的油枯为有机原料。添加活性物质含量高的矿物源腐植酸0.5%刺激水稻生长发育;(2) 无机原料:氮源采用尿素、氯化铵;磷以启动肥的作用为主,选择水溶性磷高的磷酸二铵;钾源为氯化钾(红钾);中量元素使用黄磷渣;微量元素添加氧化锌;氮稳定剂为硝化抑制剂。

1.3.3 配方设计

有机-无机复合肥有机质含量 $\geq 20\%$, 氮、磷、钾养分含量 $\geq 15\%$, 其养分含量 N-P₂O₅-K₂O-Si-Zn 为 8-4-4-3-0.3。

1.3.4 工艺和农业应用

颗粒硬度、含水量、稳定性达到了《有机无机复混肥料》(GB/T 18877—2020) 的要求, 有害物质含量完全达标。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 植株样品的采集及指标测定

在收获前 1 ~ 2 d, 每个小区随机取 10 穴有代表性的水稻调查穗数、穗粒数、结实率和千粒重。调查结束后齐地收割装入网袋风干后分为籽粒和茎秆, 磨碎、过筛, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 连续流动分析仪 (AA3, 德国 SEAL) 测定氮含量。各小区单独收获, 以风干重记产。

1.4.2 稻田径流损失的测定

水稻生长周期中, 未降水时稻田排水时收集水样; 降水产生径流后采用自动水质采样器每隔 30 min 收集 800 mL 径流水, 使用电磁流量计监测每次径流水体积。径液过滤后采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定可溶性总氮含量, 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定可溶性总磷含量, 化学需氧量 (COD) 采用重铬酸钾法进行测定^[15]。氮、磷和 COD 径流总量等于整个水稻生育期中各次径流水中养分浓度与径流水体积乘积之和。

1.4.3 土壤氨挥发的测定

采用密闭室间歇通气法测定土壤氨挥发。该装置包括密闭室、通气管、洗气瓶和真空泵 4 部分, 这些装置通过塑料管道两两相连, 形成一个有限的密闭空间。密闭室直径为 26 cm、高 15 cm、底部开放顶部留一通气孔的有机玻璃圆柱体。密闭室上的通气孔与插入土内的高为 250 cm 的通气管通过塑料管相连, 以保证交换空气氨浓度一致。利用真空泵减压抽气使罩子内土壤挥发出来的氨随气流通过装有吸收液的洗气瓶而被吸收。换气频率 20 次/min 以上, 在洗气瓶中装 40 mL 0.05 mol/L H₂SO₄ 溶液以吸收 NH₃, 吸收液用连续流动分析仪 (AA3, 德国 SEAL) 测定 NH₄⁺-N 浓度。施肥后第 2 d 开始测定氨挥发量, 施肥后每 2 d 进行一次取样, 直至氨挥发量降至与不施肥处理相同水平时停止取样, 每天 9:00 ~ 11:00 测定 2 h, 以 2 h 的通量值作

为每天氨挥发的平均通量。氨挥发通量计算方法:

$$F = \frac{C \times V \times 14 \times 10^{-2} \times 24}{\pi \times r^2 \times t}$$

式中, F 为氨挥发通量 [kg/(hm²·d)], C 为吸收液中 NH₄⁺-N 的浓度 (mol/L), V 为稀硫酸吸收液的体积 (mL), r 为气室的半径 (cm), t 为氨挥发收集时间 (h)。

NH₃ 累积排放量的计算公式为:

$$C = \sum \frac{(F_j + F_i)}{2} \times (t_j - t_i)$$

式中, C 为 NH₃ 累积排放量, F_i 和 F_j 分别为施肥后第 i 次和第 j 次 NH₃ 挥发速率 [kg/(hm²·d)], t_i 和 t_j 分别为第 i 次和第 j 次采样对应的施肥后天数。

1.5 参数计算与统计分析

植物氮素累积量 (kg/hm²) = 籽粒氮素含量 × 籽粒产量 + 秸秆氮素含量 × 秸秆生物量

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素累积量 / 植株氮素累积量 × 100

氮肥吸收利用率 (%) = (施肥处理地上部氮累积量 - 不施氮肥处理地上部氮累积量) / 施氮量 × 100

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施肥处理水稻产量 - 不施氮肥处理水稻产量) / 施氮量

氮肥生理利用率 (kg/kg) = (施氮区水稻产量 - 不施肥区水稻产量) / (施氮区植株氮素累积量 - 不施肥区植株氮素累积量)

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施肥处理水稻产量 / 施氮量

土壤氮供应量 = 不施肥处理地上部植株氮累积量 + 不施肥处理土壤氮排放量

采用 Excel 2021 进行数据整理, 采用 SPSS 20.0 进行统计分析, 采用最小显著差异法 (LSD) 在 P<0.05 水平进行显著性检验, 采用 Origin 2021 作图。利用 R 语言的“relaimpo”包进行产量构成因子对产量的相对重要性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对水稻产量及产量构成的影响

不同施肥模式下水稻产量及产量构成因子存在显著差异 (P<0.05, 表 2)。不同施肥模式处理的水稻产量比不施肥处理显著提高了 20.8% ~ 68.1%,

其中绿色模式水稻产量最高 (12.1 t/hm²)。与常规模式相比,绿色模式的水稻产量提高了16.3%,而有机模式的水稻产量降低了16.4%。不同施肥模式的水稻产量构成因子结果显示,常规模式和绿色模式显著提高了穗数和穗粒数 ($P < 0.05$),不

同模式千粒重和结实率差异不明显。常规模式和绿色模式较不施肥处理的穗数分别增加了25.7%和17.0%,穗粒数分别增加了24.9%和41.0%。绿色模式达127粒/穗,较常规模式提高了12.9%。

表2 不同施肥模式对水稻产量及产量构成因子的影响

| 处理 | 穗数 (10 ⁴ /hm ²) | 穗粒数 (粒/穗) | 结实率 (%) | 千粒重 (g) | 产量 (t/hm ²) |
|------|--|---------------|-------------|-------------|-------------------------|
| 不施肥 | 397.5 ± 21.5c | 90.1 ± 7.8b | 84.2 ± 1.5a | 25.0 ± 0.5a | 7.2 ± 0.9d |
| 常规模式 | 499.5 ± 23.5a | 112.5 ± 10.5a | 81.5 ± 2.2a | 24.5 ± 0.6a | 10.4 ± 1.2b |
| 有机模式 | 421.5 ± 19.5bc | 91.0 ± 9.6b | 83.5 ± 1.9a | 24.8 ± 0.9a | 8.7 ± 0.6c |
| 绿色模式 | 465.5 ± 17.8ab | 127.0 ± 11.3a | 84.3 ± 2.6a | 24.5 ± 0.6a | 12.1 ± 0.7a |

注:不同小写字母表示不同施肥模式间差异达到5%显著水平。下同。

2.2 不同施肥模式对水稻氮素利用效率的影响

水稻植株氮累积量在施肥后显著增加,而氮收获指数处理间无显著差异 (表3)。不同施肥模式的氮素累积量比不施肥处理显著增加了36.2%~127.6%,其中绿色模式的植株氮累积量最高,较常规模式增加了37.7%。不同施肥模式的氮利用效率结果显示,与

常规模式相比,绿色模式的氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力分别提高12.5%、8.8 kg/kg、9.0 kg/kg和13.0 kg/kg。相反,有机模式的氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力较常规模式分别降低13.1%、8.9 kg/kg、8.1 kg/kg和5.9 kg/kg。

表3 不同施肥模式对植株氮累积量及氮利用效率的影响

| 处理 | 植株氮累积量 (N kg/hm ²) | 氮收获指数 (%) | 氮肥吸收利用率 (%) | 氮肥农学利用率 (kg/kg) | 氮肥生理利用率 (kg/kg) | 氮肥偏生产力 (kg/kg) |
|------|--------------------------------|-----------|-------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 不施肥 | 93.6c | 73.5a | — | — | — | — |
| 常规模式 | 154.8b | 79.3a | 31.9b | 16.7b | 52.3b | 54.2b |
| 有机模式 | 127.5bc | 76.8a | 18.8c | 7.8c | 44.2c | 48.3c |
| 绿色模式 | 213.2a | 79.2a | 44.4a | 25.5a | 61.3a | 67.2a |

2.3 不同施肥模式下环境排放差异

不同施肥模式对土壤氨挥发、田面径流氮/磷损失和COD均有显著影响 (表4)。各施肥处理的土壤氨挥发量和径流损失均显著高于不施肥处理,其中常规模式的氨挥发量 (较不施肥处理增加了31.8 kg/hm²) 和氮、磷径流损失量 (较不施肥处理分别增加了124%和65%) 最高。与常规模式相比,有机模式和绿色模式的土壤氨挥发量分别

降低了63.3%和56.3%,全氮、总磷径流损失量分别降低了38.1%和41.4%、6.5%和14.4%。绿色模式与有机模式的土壤氨挥发量和径流养分损失量处理间无显著差异,而常规模式径流损失的COD较绿色模式显著降低了19.3%。

2.4 不同施肥模式下土壤氮素平衡

不同施肥模式下土壤氮素投入、输出和平衡情况如图1所示。在无肥料投入时,可以根据水稻植株氮素累积量和土壤氮损失量评估土壤氮供应能力。在本研究中,试验地土壤氮供应能力为117 kg/hm²。根据土壤氮供应和化肥、有机肥的氮投入量及输入量、损失量计算出土壤氮素平衡,结果显示绿色模式的土壤氮盈余量最低,仅为48.3 kg/hm²。与常规模式相比,绿色模式的土壤氮盈余量降低了41.5%,而有机模式的土壤氮盈余量增加了64.8%。

2.5 不同施肥模式下经济效益评估

不同施肥模式下经济效益情况如表5所示。不

表4 不同施肥模式对土壤氨挥发和径流损失的影响 (kg/hm²)

| 处理 | 氨挥发 | 径流损失 | | |
|------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| | | 全氮 | 总磷 | 化学需氧量 |
| 不施肥 | 10.51 ± 2.12c | 13.22 ± 1.77c | 1.22 ± 0.26c | 24.96 ± 2.63c |
| 常规模式 | 42.34 ± 5.85a | 29.65 ± 3.12a | 2.01 ± 0.33a | 41.32 ± 1.21b |
| 有机模式 | 15.55 ± 3.63b | 18.34 ± 1.58b | 1.88 ± 0.21b | 55.36 ± 2.44a |
| 绿色模式 | 18.52 ± 3.64b | 17.36 ± 2.31b | 1.72 ± 0.24b | 51.23 ± 3.26a |

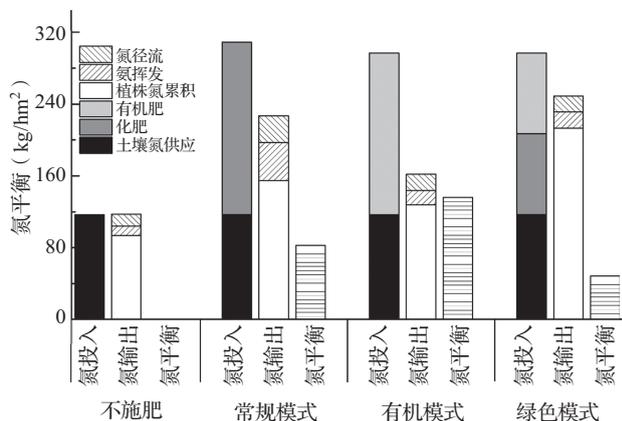


图1 不同施肥模式下土壤氮素平衡

表5 不同施肥模式对经济效益的影响

| 收支 | 分类 | 明细 (元/hm ²) | 常规模式 | 有机模式 | 绿色模式 |
|-----|----|-------------------------|-------|-------|-------|
| 支出 | 物料 | 秧苗 | 5400 | 6000 | 5400 |
| | | 肥料 | 3548 | 15566 | 10907 |
| | | 劳务费 | 8700 | 21000 | 8700 |
| | | 机械 | 16500 | 13500 | 16500 |
| | | 土地 | 21600 | 21600 | 21600 |
| 收入 | 稻谷 | 单价 (元/kg) | 6 | 10 | 8 |
| | | 产值 | 62400 | 87000 | 96800 |
| 净利润 | | | 6652 | 9334 | 33693 |

注：稻谷单价为企业对外收购稻谷价格。

同施肥处理中，由于管理模式不同，物料支出情况存在较大差异。其中，有机模式使用单独培育有机秧苗，育苗全程符合有机生产标准，因此，有机模式秧苗成本高于常规和绿色模式。有机模式全程未使用除草剂，为保证水稻正常生长不受影响，全生育期多次采用人工除草，而常规和绿色模式则通过喷施除草剂降低劳务费用。有机模式采用人工除草和防病，因此机械费用较低，而常规和绿色模式采用无人机飞防等措施增加了机械费用。不同施肥模式的稻谷产值表现为绿色模式 > 有机模式 > 常规模式。绿色模式的净利润最高，较常规模式和绿色模式分别提高了 2.7 万和 2.4 万元/hm²。

3 讨论

3.1 绿色施肥模式对水稻产量的影响

施肥措施在提高作物产量、产量稳定性和土壤肥力方面发挥着至关重要的作用^[16]。随着绿色农业的发展，有机肥的使用得到了广泛推广，以往的许多研究表明，施用有机肥可以提高作物产量^[17]。本研究表明，施肥可以显著提高水稻产量，

其中绿色模式的水稻产量和氮利用效率最高，而常规模式和有机模式相对较低（表2、表3），表明有机肥替代部分化肥在提高水稻产量的同时提高了氮素利用效率。研究表明，有机肥替代部分化肥可以调节土壤中的养分转化速率，从而有利于作物增产稳产^[18]。这是因为，首先，土壤有机质含量是影响作物生长的重要因素，施用有机肥可以提高土壤有机质含量，从而促进土壤微生物的活性和养分转化^[19]；其次，施用有机肥能够为水稻生长提供小分子有机氮，部分小分子可能有生物信号以及缩短氮素代谢途径降低生物能源代价的作用，从而促进水稻根系吸收有机氮^[20]。同时，有机肥在土壤中通过矿化作用缓慢且持续的释放氮素养分，满足水稻生育后期对氮素的吸收利用^[21]。在本研究中，水稻产量构成因子对产量的相对贡献率结果显示，穗粒数和穗数对产量的影响最大（图2）。氮素是水稻穗粒数和穗数形成的重要营养元素^[22]，因此，绿色模式的氮素持续供应能力是提高水稻产量和氮素利用效率的重要原因之一。此外，有机肥替代部分化肥可以降低氨挥发、减少氮淋失、增加微生物固持，提高土壤氮库，进而保证水稻氮素供应、提高产量^[21]。绿色模式提高水稻产量可能还与有机-无机绿色智能肥中添加的硅和锌等微量元素有关。前人研究表明，施用硅肥可以提高水稻根系活力、叶片叶绿素含量和叶面积指数^[23]，此外，硅肥在水稻抗病虫害、抗旱等生物和非生物胁迫中也发挥重要作用^[24]；廖文强^[25]提出水稻基施锌肥可以提高水稻产量的原因是提高了水稻分蘖、穗数和穗粒数。

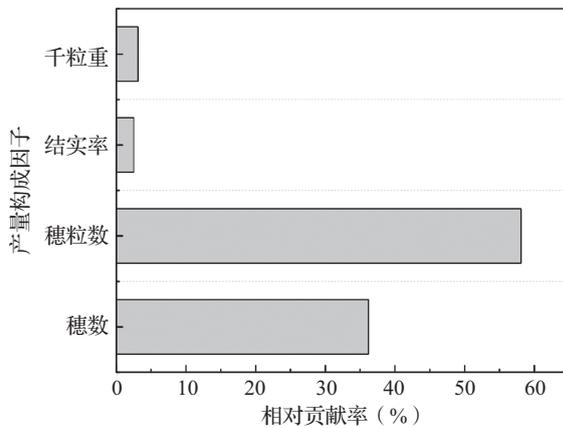


图2 产量构成因子对水稻产量的相对贡献率

大量不合理的施用化肥带来的一系列问题使得在农业生产中提出了有机肥完全替代化肥的方法，即“有机农业”^[6]。然而，关于有机农业和常规农

业对产量和环境影响的争论在国内外均普遍存在。Moe 等^[26]研究表明,施用有机肥降低了水稻的叶片叶绿素含量和分蘖数,进而产量降低,其原因主要为有机肥高碳氮比限制了养分释放,导致水稻分蘖期缺氮。黄兴成等^[22]研究发现,有机肥全量替代化肥处理的水稻产量显著低于平衡化肥处理,主要原因是有机肥养分释放较慢导致土壤氮素供应不足,水稻分蘖数降低,从而减少穗数,导致产量降低。肖大康等^[18]基于文献数据分析了不同有机肥替代比例对水稻产量的影响,结果显示,在肥力较高的土壤中,有机肥最佳替代比例是 60% 左右。在本研究中,土壤有机质含量较高(68.1 g/kg),有机肥全量替代并不利于土壤无机氮的供应,进而影响水稻生育前期分蘖、后期穗数和穗粒数。此外,洱海流域地处云南高原地区,积温高而逐日温度较低(相较于长江流域稻区),有机肥施入到土壤后矿化速率较慢,能够被当季水稻吸收利用的养分有限^[27]。

3.2 绿色施肥模式对稻田氮、磷损失的影响

氮挥发和径流氮损失是稻田主要的氮素损失途径,因此,如何降低土壤氮挥发和径流损失成为水稻生产过程中重要的研究课题^[28]。在本研究中,常规模式的氮挥发和氮径流损失量共计 72 kg/hm²,占施氮量的 37.5%。而在绿色和有机模式中,氮挥发和径流的氮素损失量分别仅为 33.9 和 35.9 kg/hm²,较常规模式分别降低了 52.9% 和 50.1%。结果表明,在洱海流域水稻生产中,施用有机肥有利于降低氮挥发,对于洱海保护具有重要作用。同样,朱文博等^[29]研究发现,施用有机肥能够减少稻田氮挥发损失和养分径流损失。首先,氮挥发和养分径流损失均与田面水中养分含量有关,郭柯凡等^[30]研究发现,施用有机肥处理的水稻田面水中铵态氮含量显著低于化肥处理,降低了稻田氮挥发损失的风险。其次,土壤氮挥发量与 pH 呈正相关关系^[31],有机肥在分解过程中会产生有机酸降低土壤 pH,同时腐殖质也会吸附铵态氮,从而降低土壤氮挥发^[32]。同时,有机-无机绿色智能肥中添加的腐植酸可以显著降低氮挥发,研究表明,腐植酸能够较好地吸附氨离子,形成稳定的腐植酸铵盐,从而降低氮挥发^[33]。王崇力等^[34]研究发现,一次性基施缓释肥料有利于降低土壤氮挥发损失,在本研究中,有机-无机绿色智能肥中添加了硝化抑制剂以延长供肥期,因此可以一次性基施,在实现轻简化生产的同时降低了氮挥发损失。此外,有机肥的施用提供了充足的氮源和碳源,促进

了微生物的活动,微生物将土壤中的无机氮固定转化为有机氮,从而降低了土壤氮挥发和氮径流损失^[35]。在本研究中,绿色模式的磷径流损失量显著低于常规模式,这与有机-无机绿色智能肥的总磷投入量有关。有机-无机智能肥的设计思路包括“磷养分总量控制原则、以氮带磷原则”,绿色模式的总磷投入量较常规模式降低了 33.3% (表 1)。此外,洱海流域土壤有效磷含量较高(68.3 mg/kg),在水稻生产中可以适当减少磷肥的投入量。

3.3 绿色施肥模式的综合效益评价

随着收入水平的提高和健康意识的不断增强,人们对食品品质的要求逐渐提升,有机食品和绿色食品应运而生。有机食品是指按照国际有机生产要求和响应的标准生产加工的食品,有机农业通常采用有机肥替代常规农业中的化肥满足作物生长^[36]。绿色食品是指遵循可持续发展原则,绿色食品在施肥时要求有机氮肥投入量占总氮肥投入量的一半以上^[37]。在本研究中,有机模式和绿色模式的生产过程严格按照有机食品和绿色食品标准进行种植。有机和绿色模式的生产投入较常规模式分别增加了 2.2 万和 0.7 万元/hm²,而有机和绿色模式的水稻单价高于常规模式(表 5)。不同模式的净利润结果显示,与常规模式相比,有机模式和绿色模式水稻净利润分别提高了 40% 和 407%,结果表明,水稻绿色种植模式可以显著增加收益。

通过合理施肥兼顾水稻高产、高效、环境减排和农民增收至关重要。在本研究中,绿色模式在实现高产和高氮肥利用效率的同时,实现了减排和增收(图 3)。常规模式有较高的水稻产量,但氮

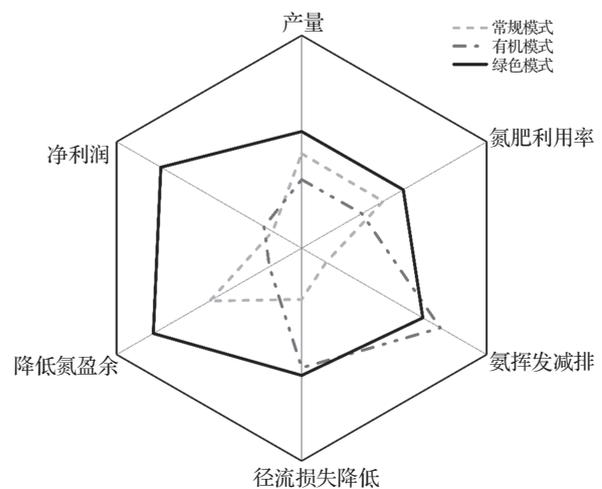


图 3 不同施肥模式下水稻产量、氮肥利用效率和减排的综合评价

素损失量较高。相反,有机模式降低了氮素损失量,但付出的代价是较低的产量、氮肥利用率和净利润。因此,绿色模式是洱海流域高产、高效、绿色、高值的施肥模式,值得在全流域进行推广。

4 结论

与常规模式和有机模式相比,绿色模式显著提高了水稻穗粒数和穗数,进而提高了水稻产量,水稻氮素累积量、氮肥利用率均显著增加,同时降低了土壤氮盈余量。绿色模式和有机模式的土壤氮挥发和养分径流损失量显著低于常规模式。绿色模式在实现减排、高产、高效的同时,也提高了水稻的净利润,是洱海流域农业绿色可持续发展的重要途径。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [2] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240.
- [3] 董春华,高菊生,曾希柏,等. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 336-345.
- [4] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008(10): 3133-3139.
- [5] 任科宇,陆东明,邹洪琴,等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716-725.
- [6] 周建斌. 作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1686-1693.
- [7] 张福锁,申建波,危常州,等. 绿色智能肥料:从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 873-887.
- [8] Zou T T, Meng F L, Zhou J C, et al. Quantifying nitrogen and phosphorus losses from crop and livestock production and mitigation potentials in Erhai Lake Basin, China[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 211: 103745.
- [9] 陈小华,钱晓雍,李小平,等. 洱海富营养化时间演变特征(1988-2013年)及社会经济驱动分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 70-78.
- [10] 项颂,吴越,吕兴菊,等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2474-2483.
- [11] 段四喜,杨泽,李艳兰,等. 洱海流域农业面源污染研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 279-286.
- [12] 郭迎新,陈永亮,苗琪,等. 洱海流域植烟土壤养分时空变异特征及肥力评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 1987-1999.
- [13] 何张伟,梁燕,杨艳,等. 洱海流域水稻产业转型发展思考[J]. 中国种业, 2021(11): 47-49.
- [14] 吴凡,张克强,谢坤,等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氮挥发变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1735-1742.
- [15] 张海香,李天阳,何丙辉,等. 不同施肥与耕作方式下土壤-径流氮磷变化特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 281-287.
- [16] Lan X J, Shan J, Huang Y, et al. Effects of long-term manure substitution regimes on soil organic carbon composition in a red paddy soil of southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 221: 105395.
- [17] Liang B, Yang X Y, Daniel V, et al. Fate of ¹⁵N-labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2013, 49: 977-986.
- [18] 肖大康,丁紫娟,胡仁,等. 不同地力水平和施氮量下水稻优质高产的氮肥有机替代比例[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1804-1815.
- [19] 龚伟,颜晓元,王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3): 336-342.
- [20] 方胜志,高佳蕊,王虹桥,等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1173-1181.
- [21] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1033-1042.
- [22] 黄兴成,李渝,刘彦伶,等. 整治稻田水稻生长及水肥利用对不同施肥的短期响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S1): 1-6, 12.
- [23] 苏庆旺,苍柏峰,白晨阳,等. 施硅量对旱作水稻产量和干物质积累的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(1): 87-95.
- [24] 龚金龙,张洪程,龙厚元,等. 水稻中硅的营养功能及生理机制的研究进展[J]. 植物生理学报, 2012, 48(1): 1-10.
- [25] 廖文强. 锌肥对水稻产量和籽粒锌含量的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- [26] Moe K, Htwe Z A, Thu P T T, et al. Effects on NPK status, growth, dry matter and yield of rice (*Oryza sativa*) by organic fertilizers applied in field condition[J]. *Agriculture*, 2019, 9(5): 109.
- [27] 马力,杨林章,颜廷梅,等. 长期施肥水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 286-294.
- [28] 张子璐,刘峰,侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3292-3302.
- [29] 朱文博,刘鸣达,肖珣,等. 化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(6): 728-733.
- [30] 郭柯凡,王丰,娄文月,等. 有机种植对滨海稻田氮挥发特征及水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(10): 243-249.
- [31] 赵政鑫,王晓云,田雅洁,等. 基于Meta分析的不同生



- 产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43 (3): 1678-1687.
- [32] Zhang T, Liu H B, Luo J F, et al. Long-term manure application increased greenhouse gas emissions but had no ammonia volatilization in a Northern China upland field [J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 230-239.
- [33] 刘方春, 邢尚军, 刘春生, 等. 褐煤腐殖酸对铵的吸附特性研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005 (4): 514-518.
- [34] 王崇力, 韩桂琪, 徐卫红, 等. 专用缓释肥的土壤氨挥发特性及其对辣椒氮磷钾吸收利用的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22 (2): 143-150.
- [35] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氨挥发损失及减排技术研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (1): 16-25.
- [36] 卢东, 宗良纲, 肖兴基, 等. 华东典型地区有机与常规农业土壤重金属含量的比较研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005 (1): 143-147.
- [37] 任永泉, 付立东, 杨捷, 等. 绿色食品水稻生产操作规程 [J]. 北方水稻, 2009, 39 (1): 40-42, 49.

Effects of different fertilization patterns on rice yield, nitrogen and phosphorus emission in the Erhai Basin

ZHANG Shun-tao^{1, 2}, KANG Suo-qian^{1, 2}, DU Xue-li^{2, 3}, TAN Dan^{2, 3}, WANG Rui⁴, HUANG Fei⁵, WEI Chang-zhou⁶, GUO Shi-wei⁷, XU Jiu-liang^{1, 2*} (1. College Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100010; 2. Erhai Basin Academy of Agricultural Green Development Research, Dali Yunnan 671000; 3. School of Agricultural, Yunnan University, Kunming Yunnan 650000; 4. Dali Cang'er Liuxiang Agricultural Development Co., Ltd., Dali Yunnan 671000; 5. Planting Industry Development Center in Dali City, Yunnan Province, Dali Yunnan 671000; 6. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832000; 7. College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095)

Abstract: In the Erhai Basin, rice is one of the most significant food crops. Irrational fertilization practices have reduced rice yields and production values, and the high nitrogen and phosphorus losses in paddy fields pose a challenge to the prevention and control of non-point source pollution in Erhai Basin. The effect of organic-inorganic green intelligent fertilizers on rice yield and environmental emissions in the Erhai Basin was investigated to provide theoretical basis for rational fertilization of rice in Erhai Basin. A field experiment was conducted in Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province, in 2022, with four fertilization treatments of no fertilization, chemical fertilization alone, organic fertilization alone and organic-inorganic green intelligent fertilization, to analyze rice yield and its constituent factors, nitrogen utilization efficiency, ammonia volatilization, runoff nitrogen and phosphorus losses and chemical oxygen demand of the runoff water, and production value. The results showed that: (1) Rice yield were increased by 44.4%, 20.8% and 68.1% in chemical fertilization alone, organic fertilization alone and organic-inorganic green intelligent fertilization treatment, respectively, compared with no fertilization treatment, with the organic-inorganic green intelligent fertilization treatment having the highest rice yield. The organic-inorganic green intelligent fertilization treatment mainly increased the number of spikes and grains of rice, which in turn increased the rice yield. (2) The aboveground nitrogen accumulation of the organic-inorganic green intelligent fertilization treatment was significantly higher than that of the chemical fertilization alone and organic fertilization alone. Nitrogen apparent recovery efficiency, nitrogen agronomy utilization efficiency, nitrogen physiology efficiency and nitrogen partial factor productivity of the organic-inorganic green intelligent fertilization were 12.5%, 8.8 kg/kg, 9.0 kg/kg and 13.0 kg/kg higher than those of the chemical fertilization alone, respectively. (3) Ammonia volatilization, nitrogen, phosphorus losses were reduced by 63.3% and 56.3%, 38.1% and 41.4%, 6.5% and 14.4%, respectively, for the organic fertilization alone and organic-inorganic green intelligent fertilization, and the nitrogen surpluses were reduced by 41.5%, compared to the chemical fertilization alone treatment. (4) The net profit of the organic-inorganic green intelligent fertilization treatment was 27000 and 24000 Yuan/hm² higher than that of the chemical fertilization alone and organic fertilization alone treatment, respectively. The organic-inorganic green intelligent fertilization treatment significantly increased the number of grains and spikes, and consequently the rice yield, and the rice nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer utilization were significantly increased. At the same time, the chemical fertilization alone treatment reduced soil ammonia volatilization, nitrogen and phosphorus runoff loss and soil nitrogen surplus compared with traditional fertilization pattern. Therefore, the application of organic-inorganic green intelligent fertilizer could achieve high yield, high efficiency, emission reduction and value-added synergistic effect of rice in Erhai Basin.

Key words: rice; green intelligent fertilization; Erhai Basin; ammonia volatilization; environment emission; green food